

# 基于热红外的真空绝热板真空度检测研究

王少杰 冯勇建\* 黄元庆 吴俊超 俞龙发  
(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

## Pressure Measurement of Vacuum Insulation Panel with Infrared Spectroscopy

Wang Shaojie, Feng Yongjian\*, Huang Yuanqing, Wu Junchao, Yu Longfa  
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** A novel technique has been successfully developed to non-destructively evaluate the pressure in the vacuum insulation panel (VIP) fabricated on industrial scale. In the newly-developed technique, the heat radiation device, embedded in the VIP and energized in non-contact mode by the lab-built external power-supply, is capable of emitting infrared (IR) light. The internal pressure can be indirectly estimated via data analysis of the spectrum and image acquired with a digital IR camera. The impact of the time evolution of the pressure on the IR image was experimentally and analytically simulated. The preliminary results show that the newly-developed IR pressure-probe is feasible to measure rapidly the VIP pressure with high reliability. Further improvement of its measurement accuracy was under way.

**Keywords** Thermal infrared, VIP, The degree of vacuum, Rapid detection, Image processing

**摘要** 真空绝热板(VIP)主要是依靠其内部真空度来提高其绝热性能的,由于导热系数是表征真空绝热板绝热性能最重要的物性参数,准确测量出真空绝热板的导热系数,有助于将真空绝热板应用于需要绝热保温的场合并估算出其热负荷情况,为系统选择制冷设备或加热设备提供依据。在对真空绝热板真空度检测技术的研究中,本文致力于研究一种基于热红外技术的真空绝热板真空度检测方法,主要采用埋入热辐射器件、能量由外部无损耦合提供、使用红外热图像处理技术并结合电路控制系统等实现对真空绝热板的真空度检测。实验表明,红外检测技术用于测量真空度是可行的、检测速度快、检测结果可靠;对热红外检测技术的研究有利于推动国内真空度快速检测技术的发展。

**关键词** 热红外 真空绝热板 真空度 快速检测 图像处理

中图分类号: TB771

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.11.04

当今世界能源危机日趋严重,能源成本日益高涨,节能减排已成为全世界共同面临的课题。真空绝热板(VIP)是一种先进的高效节能产品,是基于真空绝热原理制成,通过最大限度提高板内真空度并填充以芯层绝热材料而实现隔绝热传导,从而达到保温、节能的目的<sup>[1]</sup>。但VIP的性能检测是一个难题,其性能好坏取决于其板内的真空度的高低<sup>[2]</sup>。由于VIP不能开孔,真空腔狭窄,普通的检测技术方法不能使用,因此必须通过某种特殊的检测技术方法才能对VIP的性能进行鉴定,从而保证生产的VIP产品满足质量要求。

中国对VIP检测技术的研究处于刚起步状态,主要采用大平板热保护法及其原理研发VIP导热系数的测试装置。这种装置是基于—维稳态导热,采用热流量的方式计算出VIP的导热系数,虽然测试精度高,但稳定时间长,测量周期长。中国研发这类测试装置主要有北京时代新天科贸有限公司研发的TPMBE平板导热仪(导热系数测定仪)和上海海事大学设计的双室热保护法测定VIP导热系数的测试装置等<sup>[3]</sup>。

国外检测技术主要分两种:常规检测和快速检测方法。常规检测方法是通过测量导热系数值来衡

收稿日期: 2012-11-27

\* 联系人: Tel: 15960266295; E-mail: 2008wangshaojie@sina.com

量 VIP 的真空泄漏度和绝热效果,其导热系数测量方法采用国际上通用的热流计法<sup>[4]</sup>。如日本 EKO 公司生产的 HC-074 系列热流法导热系数测量仪,是测量绝热材料导热系数最先进和最容易使用的仪器。相对于常规检测,快速检测明显具有很大优势和市场。如日本 EKO 公司推出了 HC-420 系列 VIP 快速检测仪,检测 VIP 真空度的时间只需 6 min<sup>[5]</sup>。法国塞塔拉姆仪器公司生产的 VIP 快速无损热检测装置—TCI 导热系数仪<sup>[6]</sup>,其检测速度快,且可以进行无损热检测。相对常规检测,快速检测的优点是检测速度快,但该检测成本高。

由于中国对 VIP 的检测技术研究比较晚,发展还不够成熟,因此目前中国主要采用传统的检测技术或是向国外公司进口快速检测仪器对 VIP 进行性能检测。若采用传统检测技术方法对 VIP 进行性能检测,虽然检测精度较高,但是其检测方法慢,平均测试一块板需要 45 min,而且随着 VIP 板的厚度增加,其检测时间越长,因此采用传统的检测技术效率低,需要消耗大量的时间,严重影响了生产效率。

为了提高中国 VIP 的检测速度,本文致力于探索应用红外热图像处理技术来研究一种新型的真空绝热板的快速检测方法,检测范围为 0 ~ 120 Pa,检测时间大约需 3 min,未进行精确标定前检测误差在 10% 以内。该方法采用红外热成像的原理,通过在 VIP 内埋入热辐射器件,能量由外部无损耦合,对板内不同气压下的 VIP 红外热图像进行检测、处理和分析计算,得到红外热图像灰度变化与 VIP 内部气压的线性比例关系,进而检测出 VIP 的真空度。

## 1 VIP 检测原理

红外图像的成像机理是通过将红外探测器接收到的场景(包括其中的动态目标、静态目标以及背景)的红外辐射映射成灰度值,转化为红外图像,场景中的某一部分的辐射强度越大,反映在图像中的这一部分的灰度值越高,也就越亮<sup>[7]</sup>。

在红外辐射的分析计算中,通量密度是表示黑体辐射能力的物理量。Stefan-Boltzmann 定律给出了黑体的通量密度与热力学温度之间的关系,即

$$W = \sigma T^4 \quad (1)$$

式中,  $W$  为单位黑体面积所发射的功率,即辐射通量密度;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,也称黑体辐射常数,其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ;  $T$  为热力学温度。由 Stefan-Boltzmann 定律可知,黑体辐射通量密

度将随温度的升高而急剧增大。由红外热成像机理可知,红外探测器接收到场的辐射强度越大,反映在图像中的灰度值越高,图像也就越亮。由于 VIP 内部芯材的导热系数随板内气压的变化而变化,根据 ASTM C 1484-01 标准规定<sup>[8]</sup>,VIP 的导热系数大于  $11.5 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  被认为失效,如图 1 所示<sup>[9]</sup>。由图 1 可知,VIP 的导热系数随板内压力的增加而增大,当板内压力大于 50 Pa 时随板内压力升高,导热系数急剧增加,当板内气压大于 100 Pa 的时候,VIP 基本属于失效范围。

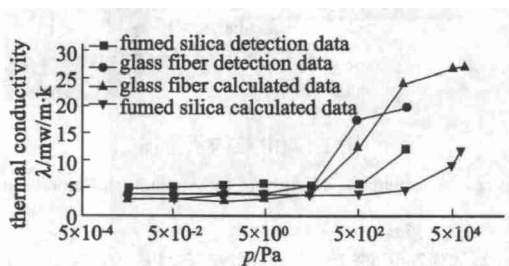


图1 VIP 的导热系数与板内气压之间的关系曲线

Fig. 1 The relationship between the thermal conductivity of the VIP and the pressure

基于红外热图像处理的 VIP 真空度检测的主要原理:

(1) 电阻在 VIP 内部的有 3 种换热方式: 传导、对流、辐射。VIP 内气压很低,基本没有空气流动;电阻和 VIP 芯材紧密接触,电阻在 VIP 内部对流换热不是主导换热;因此 VIP 的主导换热是辐射。电阻与周围辐射换热可由式(2)计算<sup>[10]</sup>,电阻导热换热可由式(3)计算。

$$\Phi = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{\lambda A}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

式中  $T_1$ ,  $T_2$  分别为电阻温度和环境温度,  $\varepsilon$  为电阻发射率,  $A$  为电阻表面积,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\lambda$  为 VIP 芯材导热系数,  $\delta$  为电阻在 VIP 内部的深度,与其在真空绝热板的内部位置有关。

(2) 在相同环境、相同电阻以及电阻在 VIP 埋入位置相同的条件下,由于真空绝热板内部压力不同,其导热系数也不同,因此电阻在 VIP 内部的散热速度不同,其周围的温度热场变化速度也将不同。检测系统根据这个特征现象,利用红外传感器检测 VIP 内部电阻及其周围的热辐射强度变化,将热辐射强度变化转化为灰度图像,利用采集卡将灰度图像传送到 PC 机上,再进行一系列图像处理、算法分

析,最终计算得出VIP内的真空度。

## 2 VIP 散热过程的 ANSYS 仿真

VIP 是采用真空隔热原理达到隔热目的,同时具有特殊结构的一种复合材料,其主要由三部分组成:芯材、表面隔膜、吸气剂<sup>[11-12]</sup>,其结构示意图如图2所示。

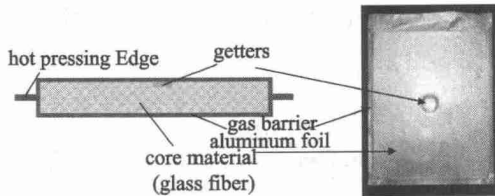


图2 VIP结构示意图

Fig. 2 A schematic diagram of the vacuum insulation panels

为了验证检测原理的可行性,在环境温度为 $25^{\circ}\text{C}$ 、电阻初始温度为 $50^{\circ}\text{C}$ 、不同的VIP内部气压情况下,对内置电阻散热过程采用二维中心对称截面进行仿真分析。阻隔性铝箔隔膜气结构是含有铝箔的多层复合材料,主要分为PET、铝和PE三层材料<sup>[13]</sup>。由实际测出VIP的阻隔性铝箔膜厚度为 $0.1\text{ mm}$ ,确定其ANSYS仿真模型截面结构如图3所示。

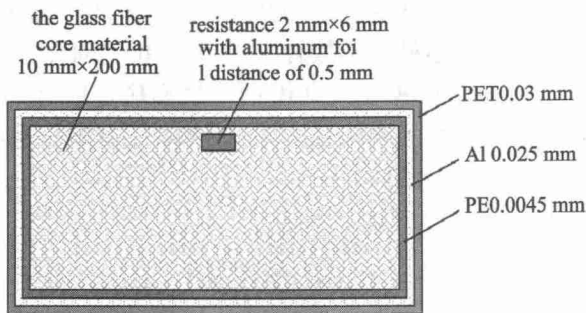
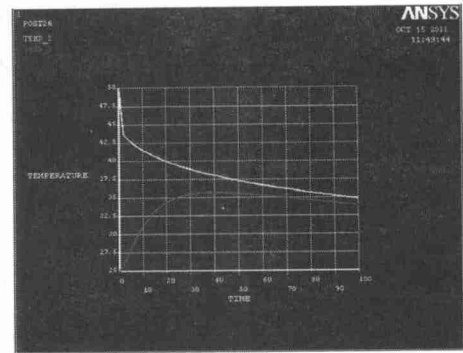


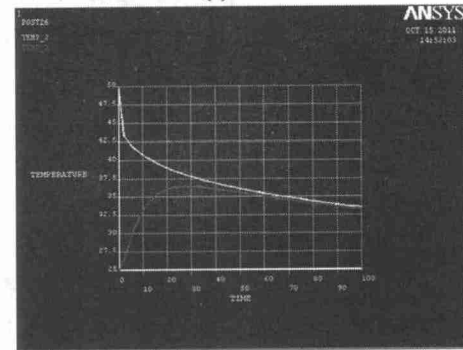
图3 VIP ANSYS 仿真模型截面图

Fig. 3 ANSYS simulation model: a cross-sectional view of the vacuum insulation panels

仿真过程中取VIP内部气压为 $0.5 \sim 100\text{ Pa}$ 内多个值进行实验,由于文章篇幅的限制,下面选取内部气压为 $5, 50\text{ Pa}$ 时电阻和箔膜表面节点温度随时间变化的曲线图(图4(a)、(b))做比较(其中TEMP\_2为电阻表面节点—白色线,TEMP\_3为箔膜表面节点—灰色线)。图5(a)、(b)分别是VIP内部气压为 $5, 50\text{ Pa}$ 时电阻散热1 min后温度场分布等值线图。



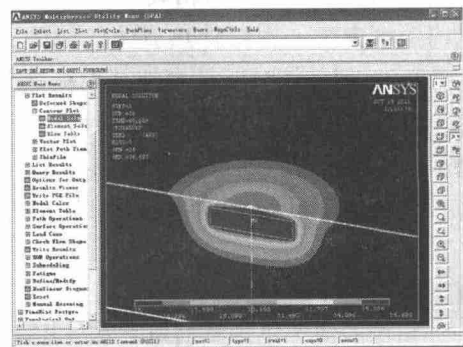
(a) 5 Pa



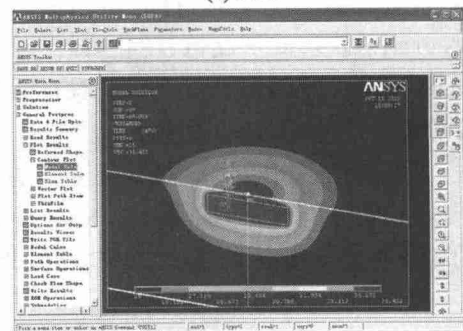
(b) 50 Pa

图4 VIP内部不同气压时电阻和箔膜表面节点温度随时间变化图

Fig. 4 The time evolution of the resistance and temperature of the membrane mode the different pressures



(a) 5 Pa



(b) 50 Pa

图5 VIP内部不同气压时温度场分布等值线图

Fig. 5 The contour plot of the temperature at the different pressures

由上述 ANSYS 仿真的节点温度随时间变化曲线图以及温度场等值线图可以看出,在同一条件下随着 VIP 内部气压的增大,电阻散热过程温度变化越大,即电阻温度下降越快,箔膜表面温度变化也越快,那么由此可以得出红外传感器采集到的红外热图像变化也越快,因此从仿真结果可以说明基于红外热技术的真空度检测原理是可行的。

### 3 实验测试

根据检测原理,搭建了如图 6 所示的测试平台进行基于热红外的 VIP 真空度的检测实验。

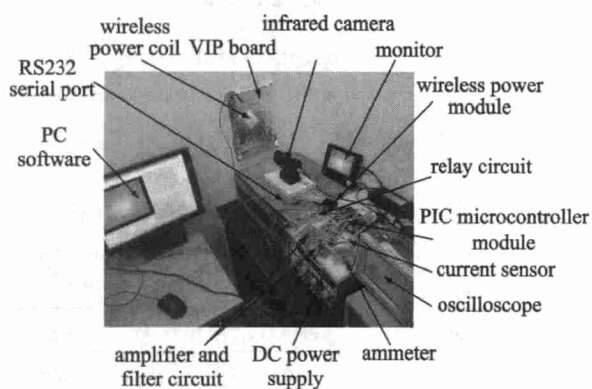


图 6 基于热红外的 VIP 真空度的检测实验图

Fig. 6 The setup for measuring the pressure of VIP by IR spectroscopy

实验过程中分别对不同板内气压下的 VIP 进行测试,采集红外热图像数据并进行图像处理,然后通过一系列的算法标定出不同气压下图像平均灰度值变化率与 VIP 内气压的关系参数。在实际 VIP 真空度检测中,只要测试出 VIP 的图像平均灰度值变化率,根据标定得到的参数可以计算出 VIP 板内气压。实验流程如图 7 所示,每次实验中 PC 机软件每隔 2 s 采集一张图像,同一块 VIP 采集几十张图进行图像均值处理计算。

实验中图像数据计算以及参数匹配的步骤如下:

对 VIP 进行红外热图像采集,将采集到的红外热图像经过一系列的图像处理,再对处理后的图像进行像素灰度值计算,求出像素平均灰度值。

画出像素平均灰度值与时间的关系图,再利用最小二乘法进行直线拟合,计算在该压力下像素平均灰度值随时间的变化率。

多次重复(1)和(2)步骤,然后将多次的匹配出的直线斜率取算术平均值。

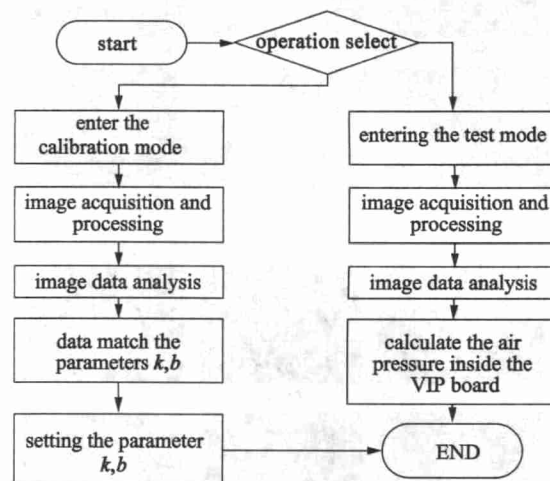


图 7 实验流程图

Fig. 7 Experimental flow chart

再取板内气压分别为 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 Pa 10 种 VIP 通过上述(1) - (3) 步骤进行测试,求出各压力下像素平均灰度值随时间的变化率的算术平均值。

将上述计算得到的各种气压下 VIP 内图像平均灰度值变化率与各板内气压建立关系,画出其关系图,然后通过最小二乘法进行直线拟合,算出最终参数  $k$  和  $b$ 。

如图 8 所示为板内气压为 20 Pa 的 VIP 的红外热图像随时间变化图。由图中可以看出图像随着时间的推移,图像亮度逐渐由亮变暗,也就是其像素灰度值不断的减小。

表 1 为各压力下像素平均灰度值随时间的变化率数据值,图 9 为计算后的像素平均灰度值随时间的变化率与板内气压关系图。从图 9 可以看出,像素平均灰度值变化率与板内气压呈近似的线性关系,利用最小二乘法进行直线拟合,通过二次直线拟合,像素平均灰度值随时间的变化率与板内气压关系的直线斜率  $k$  为 0.00242,截距  $b$  为 0.3372,即其线性方程  $y = kx + b$  为

$$y = 0.00242x + 0.3372 \quad (4)$$

式中:  $y$  为红外热图像像素平均灰度值变化率,  $x$  为板内气压。

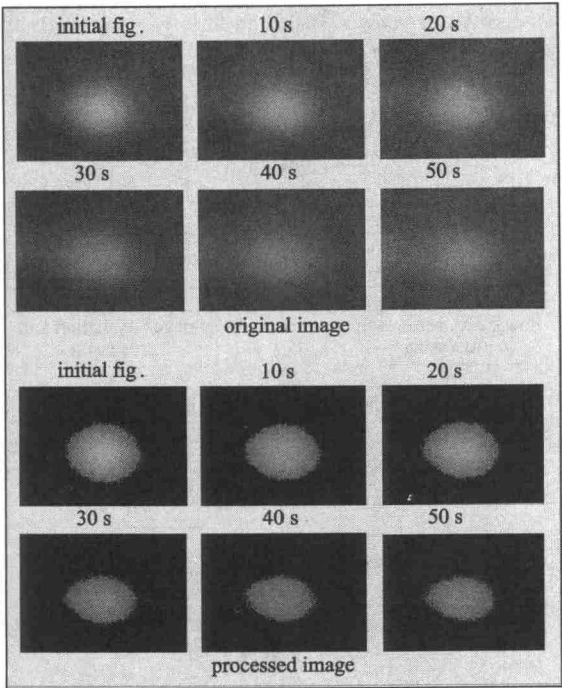


图 8 板内气压为 20 Pa 的 VIP 的红外热图像  
Fig. 8 The IR images of the VIP at 20 Pa

表 1 像素平均灰度值随时间的变化率数据

Tab. 1 The time evolution of the average pixed gray-scale

板内气 压/Pa	像素平均灰度值随时间的变化率(曲线斜率)						—平均值
	1	2	3	4	5	6	
1	0.3075	0.2932	0.3031	0.2998	0.3113	0.3076	0.3038
10	0.3591	0.3624	0.3580	0.3553	0.3575	0.3514	0.3573
20	0.3864	0.3812	0.3851	0.3898	0.3814	0.3880	0.3853
30	0.4227	0.4153	0.4106	0.4182	0.4136	0.4169	0.4162
40	0.4463	0.4499	0.4471	0.4407	0.4415	0.4427	0.4447
50	0.4732	0.4778	0.4813	0.4835	0.4719	0.4775	0.4776
60	0.4933	0.5014	0.4977	0.4958	0.4935	0.4898	0.4953
70	0.5180	0.5055	0.5111	0.5028	0.5124	0.5086	0.5097
80	0.5276	0.5237	0.5198	0.5251	0.5175	0.5164	0.5217
90	0.5486	0.5432	0.5391	0.5458	0.5495	0.5383	0.5441
100	0.5561	0.5537	0.5589	0.5625	0.5608	0.5567	0.5581

根据上面标定得到的像素平均灰度值变化率与板内气压关系的线性方程,又分别制作了板内气压分别为 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Pa 等 10 块 VIP 实验板进行真空度测试,其测试结果如表 2 所示。由表 2 的数据可知,检测结果存在一定的误差,但可以看出红外检测技术用于测量真空度是可行的,其具有检测速度快、检测结果可靠等特点。对

于系统存在的误差,可能与 VIP 板内的实际真空度值有关系,实验板是在一定真空度值下封装完后就使用,未进行真空度值精确标定,后期将把工作重点放在拟合直线的参数标定上,这将大大降低测量误差值。

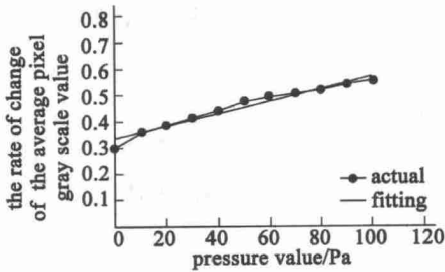


图 9 像素平均灰度值变化率与板内气压的关系图  
Fig. 9 The time evolution of the pixd gray scale varies with the pressure

表 2 10 块 VIP 实验板内真空度的实际值与测试值

Tab. 2 Comparison of the realistic and measured pressures of the ten VIP boards

编号	测试值/Pa	实际值/Pa	偏差/Pa	误差
1	10.7	10	0.70	7.02%
2	21.3	20	1.32	6.61%
3	32.0	30	2.02	6.75%
4	43.6	40	3.60	8.99%
5	54.2	50	4.17	8.35%
6	64.5	60	4.55	7.58%
7	72.4	70	2.40	3.42%
8	76.1	80	-3.88	-4.86%
9	85.8	90	-4.17	-4.64%
10	93.1	100	-6.94	-6.94%

4 结论

本文对基于红外热图像处理的真空隔热板真空度检测方法进行探索性研究,采用红外热图像处理技术,通过大量实验工作和数据分析,验证了热红外检测方法的可行性,取得一定的成果。实验过程中知道 VIP 板内像素平均灰度值变化率与板内气压可以近似为线性关系,这种近似线性关系导致检测结果必然存在一定误差,而为了消除这个误差,需要大量的数据进行多次拟合,然后进行精确的标定。我们期待对热红外检测技术的进一步研究,最终能使该检测方法产业化,推动国内真空度快速检测技术

的发展。

### 参 考 文 献

- [1] Fricke J , Heinemann U , Ebert H P. Vacuum Insulation Panels From Research to Market [J]. Vacuum 2008 82: 680 – 690
- [2] Caps R , Beyrichen H , Kraus D. Quality Control of Vacuum Insulation Panels: Methods of Measuring Gas Pressure [J]. Vacuum 2008 82( 7) : 691 – 699
- [3] 阚安康 , 韩厚德 , 王忠诚. 双室热保护法测定真空绝热板导热系数的研究 [J]. 低温与超导 2011 ( 2) : 53 – 58
- [4] 祁少明 , 董海荣. 双面热流计法测定围护结构传热系数在建筑节能改造中的应用 [J]. 河北建筑工程学院学报 2009 ( 3) : 1 – 4
- [5] VIP 板的发展现状及快速检测方法 [J/OL]. [http: // www. instrument. com. cn/netshow/SH100589/news\\_40924. htm](http://www.instrument.com.cn/netshow/SH100589/news_40924.htm)
- [6] Wessling F C , Moser M D , Wessling J M , et al. Subtle Issues in the Measurement of the Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels [J]. Journal of Heat Transfer , 2004 ( 4) : 155 – 160
- [7] 李俊山 , 杨 威 , 张雄美. 红外图像处理、分析与融合 [M]. 北京: 科技出版社 2009
- [8] ASTM Standard: C1484 – 01 , Standard Specification for Vacuum Insulation Panels [S ] 2002
- [9] 邱小波 , 鲍崇高 , 高义民 , 等. 真空绝热板导热系数与板内真空度关系研究 [J]. 真空 2011 ( 5) : 12 – 15
- [10] 陶文铨. 传热学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社 , 2006
- [11] Dow Chemical Company. Optimizing vacuum Insulation Panel Performance Using INSTILL Vacuum Insulation Core-A Design Guide for Fabricators and OEMs [R ] , 174 – 01002 – 1100X SMG 2000
- [12] 温永刚 , 王先荣 , 陈光奇. FG 型真空绝热板使用寿命评估 [J]. 真空科学与技术学报 2011 31( 1) : 110 – 113
- [13] 耿进良 , 韩厚德 , 阚安康 , 等. 真空绝热板绝热特性研究 [J]. 节能 2010 ( 12) : 24 – 27